

鄂尔多斯盆地长8储层碳酸盐胶结物成分组成与碳氧同位素特征研究

王 钊^{1,2,3}, 邱军利¹

(1. 甘肃省油气资源研究重点实验室/中国科学院油气资源研究重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 广州市地质调查院, 广东 广州 510440)

摘要:以碳—氧同位素特征为切入点辅助薄片镜下观察和沉积环境分析,对鄂尔多斯盆地长8段储层碳酸盐胶结作用进行系统研究。从镜下矿物观察可知:碳酸盐胶结物发育方解石、白云石、铁白云石、铁方解石和菱铁矿。矿物成分和分布特征受不均一流体化学活动影响强烈,碳酸盐胶结对孔渗主要起破坏作用。同时通过磷酸法测定氧—碳同位素值,由实验结果可知:碳同位素分布范围是-14.8‰~-1.5‰,氧同位素分布范围是-25.7‰~-9.9‰;样品的Z值大都小于120,指示样品中的碳酸盐胶结作用发生于淡水—微咸水环境;通过 $\delta^{18}\text{O}$ 值测定得到古温度为68℃~128℃,说明胶结作用发生于早成岩B期至中成岩阶段A期;长8上部层位碳酸盐胶结物含量比下部多,说明胶结作用来源于与有机酸脱羧作用有关的碳酸盐沉积;按照沉积亚相划分为三个区,氧—碳同位素由湖心相—重力流相—三角洲相逐渐减轻。最后推断同位素分布形成原因:压实作用下有机酸由高势区向低势区逐渐运移,经一系列化学变化后发生胶结作用有机碳被捕捉而成。

关键词:鄂尔多斯盆地;碳酸盐胶结;碳—氧同位素;沉积环境;古温度;物源;运移模型

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Study on composition, carbon and oxygen isotopic characteristics of carbonate cements in Chang-8 reservoir, Ordos Basin

Wang Zhao^{1,2,3} and Qiu Junli¹

(1. Key Laboratory of Petroleum Resources of Gansu Province & Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Guangzhou Geological Survey, Guangzhou 510440, Guangdong, China)

Abstract: Based on the study of the carbon oxygen isotopic characteristics and the observation of thin slices, we systematically studied the carbonate cementation of Chang-8 reservoir in Ordos Basin. According to the observation of the minerals under the microscope, it can be concluded that the carbonate cements were composed of the calcite, dolomite, ferrodolomite, ferrocalcite and siderite. The mineral composition and distribution are strongly influenced by the heterogeneous chemical activity of fluids. The carbonate cementation often damages the porosity and permeability. Meanwhile, the C-O isotope value was determined by the phosphoric acid method. The experimental results show that the range of carbon isotope distribution is -14.8‰ to -1.5‰, and the distribution range of oxygen isotope is -25.7‰ to -9.9‰. The Z values of the samples are mostly less than 120, indicating that the carbonate cements in the sample formed in the freshwater-brackish water environment. The paleo temperature was measured from 68℃ to 128℃ by oxygen isotope value, which shows that the cementation occurred mainly in the early diagenetic stage B to the middle diagenetic stage A. The carbonate cement content in the upper part of Chang-8 is much lower than that in the lower part, indicating that cementation was derived from carbonate deposits which were related to decarboxylation of organic acids. According to the sedimentary subfacies, the study area is divided into three areas, and the oxygen-carbon isotope gradually decreases in accordance with the half deep lacustrine subfacies-gravity flow subfacies-delta subfacies. Finally, the reasons for the present situation of isotope distribution in the basin are concluded: the organic acid moves gradually from the high potential region to the low potential region under the compaction, and the organic carbon is captured by chemical cementation after a series of chemical changes.

Key words: Ordos Basin, carbonate cementation, carbon oxygen isotope, sedimentary environment, paleo temperature, provenance, solute transport model

收稿日期:2017-07-14。

第一作者简介:王钊(1987—),男,硕士研究生,储层地质研究。

基金项目:国家科技重大专项课题“大型油气田及煤层气开发”(2016ZX05007)。

1 地质概况

1.1 胶结作用的研究意义

胶结作用是使沉积物固结稳定的过程,是成岩作用的重要过程。胶结作用十分复杂,类型多样,胶结物的生长方式和产出状态也很多。如二氧化硅次生加大边,碎屑颗粒孔隙中的微晶碳酸盐颗粒等^[1-2]。同时前人的研究证明:不同时期形成的碳酸盐胶结物其矿物组成、结构特征、碳氧同位素组成各不相同,矿物之间也可以互相穿插、叠置和交代。不同的成岩环境下,碳酸盐胶结物中氧同位素和碳同位素分布特征及变化趋势受其控制因素影响也会有所差别。碳同位素组成可以用来反映成岩流体中碳的来源,从而判断物源。而碳—氧同位素的相关研究,可以恢复对比水文条件:如古水温、古盐度等,从而判断古气候及推断沉积物成岩过程^[3-8]。

1.2 鄂尔多斯盆地长8地质概况

鄂尔多斯盆地延长组碳酸盐胶结作用普遍发

育,曾有学者对延长组碳酸盐胶结物特征做过研究^[9-10]。单以长8储层作为研究对象,按照不同层位间成分的细微差别可细分为上部长8₁和下部长8₂小层。其储层沉积相平面分布特征如图1。

长8₁储层平面分布特征:长8₁发育有三角洲平原和前缘亚相,三角洲前缘湖岸线整体分布于安塞北—盐池—环县—正宁—一线。向南部延伸的富县—白豹一带则发育滨湖—半深湖沉积环境,细分为水上、水下分流河道和河口坝。长8₁处在低位体系域,煤层发育,沉积颗粒中含有大量碳屑和植物碎屑。长8₁后期湖水位上升,湖盆地的边缘向外扩张,湖平面最大范围扩展到环县—盐池—安塞—正宁—一线(图1左)。

长8₂储层平面展布特征:长8₂主要发育三角洲平原和浅水湖重力流亚相。湖岸线位于铜川—庆阳—一定边—靖边—安塞—一线,富县—吴起地区水位逐渐加深,进入半深湖相。长8₂湖岸线较宽,位于安塞—靖边—庆阳—铜川—一定边地区,发育浅湖相沉积。在长8₂晚期湖平面下降,发生水退,吴起—富县一带发育三角洲平原相,煤层、煤线、植物碎片发育(图1右)。

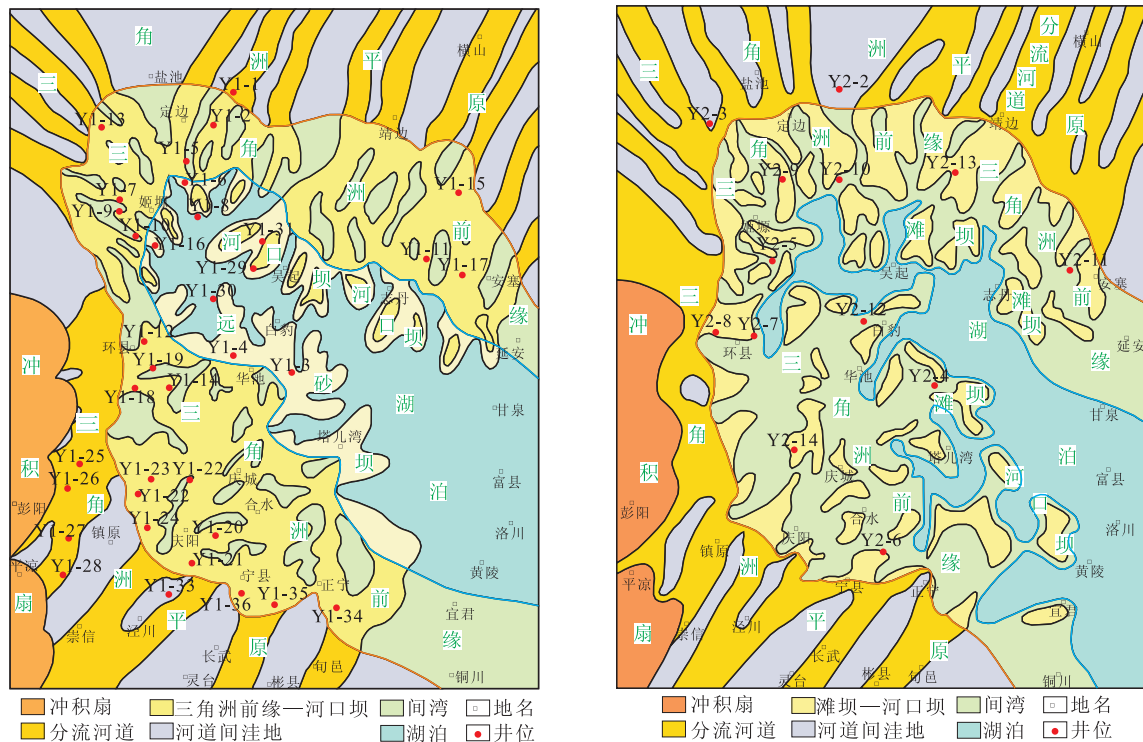


图1 鄂尔多斯盆地长8储层沉积相

Fig. 1 Sedimentary facies of Chang-8 reservoir in Ordos Basin

通过分析胶结物含量、矿物形态及碳酸盐胶结物氧—碳同位素特征,对鄂尔多斯盆地长8砂岩储层的形成条件和运移过程进行讨论,从而进一步分析成岩地球化学过程,为油气成藏研究提供建议。

2 实验

2.1 实验方法

在盆地的钻井岩心中取样,井位图见图1。选出了具有代表性的57块样品。制作铸体薄片,在偏光显微镜下对长8₁—长8₂的各岩石薄片进行系统的矿物鉴定并计算碳酸盐胶结物的相对含量。然后采用磷酸法,取含有碳酸盐胶结物的样品适量(仅提取碎

屑岩中的碳酸盐胶结物,故碳同位素并不包括有机碳的碳同位素部分)。用100%磷酸在25℃条件下处理4h,收集反应得到的CO₂气体。在中国科学院兰州地质所甘肃省油气资源研究重点实验室MAT252质谱仪上测量,碳氧同位素比值标准均为PDB,记为 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 。实验中所使用的碳酸盐参考标准为GBW04417方解石标准($\delta^{18}\text{O}$: -24.12‰; $\delta^{13}\text{C}$: -6.10‰),分析精度为 ± 0.2 ‰。

2.2 实验结果

矿物鉴定的结果可知这些碳酸盐胶结物类型多,矿物组成、矿物形态、相对含量及其意义在后面介绍。碳酸盐胶结物的氧碳同位素的分析结果见表1。分析结果表明 $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围-14.8‰~-1.5‰, $\delta^{18}\text{O}$ 变化范围-25.7‰~-9.9‰,值变化均较大。

表1 鄂尔多斯盆地延长组长8碳酸盐胶结物碳氧同位素数据
Table 1 Carbon and oxygen isotopic data of carbonate cements in Chang-8 reservoir of Yanchang formation, Ordos Basin

序号	井名	深度/m	层位	岩石类型	沉积相	$\delta^{13}\text{C}$ ‰	$\delta^{18}\text{O}$ ‰	Z值	古温度/℃
1	Y1-1	2 129.87	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	浊流	-2.4	-19.8	112.52	120.26
2	Y1-2	2 162.84	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲平原	-8.5	-16.7	101.58	97.1
3	Y1-3	2 252.98	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲平原	-6.3	-14.2	107.33	79.83
4	Y1-4	1 920.10	长8 ₁	灰绿色细砂岩	砂质碎屑流	-5.8	-14.8	108.05	83.86
5	Y1-5	2 827.40	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲前缘	-9.8	-19.4	97.57	117.16
6	Y1-6	2 244.55	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲前缘	-6.4	-23.7	102.39	152.12
7	Y1-7	2 211.06	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲前缘	-5.5	-25.7	103.24	169.64
8	Y1-8	2 793.27	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲平原	-7.8	-19.8	101.47	120.26
9	Y1-9	2 330.08	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲平原	-7.9	-20.8	100.76	128.14
10	Y1-10	2 236.35	长8 ₁	灰褐色致密细砂岩	三角洲前缘	-9	-19.4	99.21	117.16
11	Y1-11	1 744.12	长8 ₁	灰褐色致密细砂岩	半深湖	-1.6	-15.5	116.3	88.66
12	Y1-12	2 597.52	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲平原	-8.8	-16.4	101.11	94.96
13	Y1-13	2 535.05	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲前缘	-8.6	-21	99.23	129.74
14	Y1-14	2 391.91	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	浊流	-5	-14.2	109.99	79.83
15	Y1-14	2 426.90	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲平原	-10.3	-15.2	98.64	86.59
16	Y1-15	1 809.77	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	浊流	-5.6	-15.5	108.11	88.66
17	Y1-16	2 538.42	长8 ₁	灰绿色细砂岩	三角洲前缘	-9.7	-17.7	98.62	104.36
18	Y1-17	1 397.73	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	砂质碎屑流	-5.7	-14.3	108.51	80.5
19	Y1-18	2 085.94	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲前缘	-7.8	-15.1	103.81	85.9
20	Y1-19	2 124.68	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲前缘	-7.1	-15.9	104.84	91.44
21	Y1-19	2 124.68	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲前缘	-6.7	-15.6	105.81	89.35
22	Y1-20	2 008.60	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲前缘	-8.1	-16.4	102.54	94.96
23	Y1-20	2 026.62	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲前缘	-6.7	-15.8	105.71	90.74
24	Y1-21	1 963.10	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	砂质碎屑流	-4.6	-14.8	110.51	83.86

序号	井名	深度/m	层位	岩石类型	沉积相	$\delta^{13}\text{C} \text{ ‰}$	$\delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$	Z值	古温度/ $^{\circ}\text{C}$
25	Y1-22	2 617.34	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲前缘	-8	-16	102.95	92.14
26	Y1-23	2 562.44	长8 ₁	灰绿色细砂岩	三角洲前缘	-7.7	-23	100.08	146.18
27	Y1-24	2 477.37	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲前缘	-9.7	-20.4	97.28	124.96
28	Y1-25	2 727.00	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲平原	-12.8	-18.6	91.82	111.07
29	Y1-26	2 736.05	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲平原	-12.1	-17.8	93.65	105.1
30	Y1-27	2 728.56	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲平原	-12.2	-17	93.85	99.26
31	Y1-28	2 518.41	长8 ₁	灰绿色砂岩	三角洲平原	-9.2	-24.4	96.31	158.16
32	Y1-29	2 591.90	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲平原	-11.3	-16.1	96.14	92.84
33	Y1-30	2 288.88	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲前缘	-8.7	-22.3	98.38	140.34
34	Y1-31	2 238.45 2 238.50	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	砂质碎屑流	-3.5	-17	111.67	99.26
35	Y1-32	2 266.80	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	砂质碎屑流	-2.36	-17.6	113.7	103.63
36	Y1-32	2 272.40	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲前缘	-6.45	-18.2	105.03	108.07
37	Y1-32	2 274.00	长8 ₁	灰褐色含油细砂岩	三角洲前缘	-6.61	-17.6	105	103.63
38	Y1-32	2 275.00	长8 ₁	灰绿色砂岩(致密)	三角洲前缘	-7.02	-16.3	104.81	94.26
39	Y1-32	2 277.90	长8 ₁	灰黑色泥岩	浊流	-4.1	-14.3	111.78	80.5
40	Y1-33	2 209.20	长8 ₁	灰黑色泥岩	三角洲前缘	-7	-14.6	105.69	82.51
41	Y1-34	1 254.29	长8 ₁	灰黑色泥岩	三角洲前缘	-7.2	-13.6	105.78	75.87
42	Y1-35	1 319.38	长8 ₁	灰黑色泥岩	砂质碎屑流	-3.7	-10.5	114.49	56.56
43	Y1-36	1 284.58	长8 ₁	灰黑色泥岩	浊流	-4.5	-9.9	113.15	53.04
44	Y2-1	1 248.33	长8 ₂	灰黑色泥岩	浊流	-5	-13.2	110.49	73.27
45	Y2-2	2 583.48	长8 ₂	灰褐色含油细砂岩	三角洲平原	-9.5	-25.4	95.19	166.96
46	Y2-3	2 969.62	长8 ₂	灰褐色含油细砂岩	三角洲平原	-9.2	-17.8	99.59	105.1
47	Y2-4	1 899.05	长8 ₂	灰褐色含油细砂岩	浊流	-5.7	-16.3	107.51	94.26
48	Y2-5	2 596.45	长8 ₂	灰褐色含油细砂岩	三角洲平原	-11.7	-17.8	94.47	105.1
49	Y2-6	2 022.38	长8 ₂	灰褐色含油细砂岩	三角洲平原	-10	-15.1	99.3	85.9
50	Y2-7	2 621.00	长8 ₂	灰褐色含油细砂岩	三角洲平原	-9.5	-15.3	100.22	87.28
51	Y2-8	2 107.14	长8 ₂	灰褐色致密细砂岩	半深湖	-1.5	-15.7	116.41	90.04
52	Y2-9	2 231.8	长8 ₂	灰褐色含油细砂岩	三角洲前缘	-9	-20.4	98.71	124.96
53	Y2-10	2 510.13	长8 ₂	灰绿色细砂岩	三角洲前缘	-14.8	-18.9	87.58	113.34
54	Y2-11	2 133.42	长8 ₂	灰绿色细砂岩	三角洲前缘	-8.2	-15	103.04	85.22
55	Y2-12	2 241.72	长8 ₂	灰褐色含油细砂岩	三角洲平原	-9.5	-14	100.87	78.5
56	Y2-13	2 256.55	长8 ₂	灰褐色含油细砂岩	三角洲前缘	-11.1	-18.1	95.55	107.32
57	Y2-14	2 454.93	长8 ₂	灰褐色含油细砂岩	三角洲前缘	-12.1	-19.2	92.96	115.63

3 胶结物特征

3.1 矿物组成及分布

通过对岩心样品铸体薄片镜下观察,胶结作用产出状态为粒间微晶及颗粒、交代作用产物和溶蚀孔隙填充物,可见粒状单晶和连晶。成分主要有方解石、白云石、铁白云石、铁方解石和菱铁矿,具有多期胶结的显著特点。碳酸盐胶结物含量在砂体不同

部位含量变化大,分布不均匀。胶结物与矿物颗粒呈现孔隙式胶结和接触胶结,接触胶结多见点接触和线接触,未见机械性压实矿物破碎。从砂体外部看,多发育于整套砂体前端,以碳酸盐胶结阻隔层为典型特征,从内部看,碳酸盐胶结物往往在原生的高渗区中呈条带状分布;局部集中。碳酸盐的胶结作用伴随着碎屑沉积物的沉积、压实、固结和成岩过程。不同成岩阶段产出不同碳酸盐胶结物,而且形态和组成差异较大,这是因为不同阶段流体—岩石相互作用的环境参数:pH值、Eh值等各不相同(图2)。

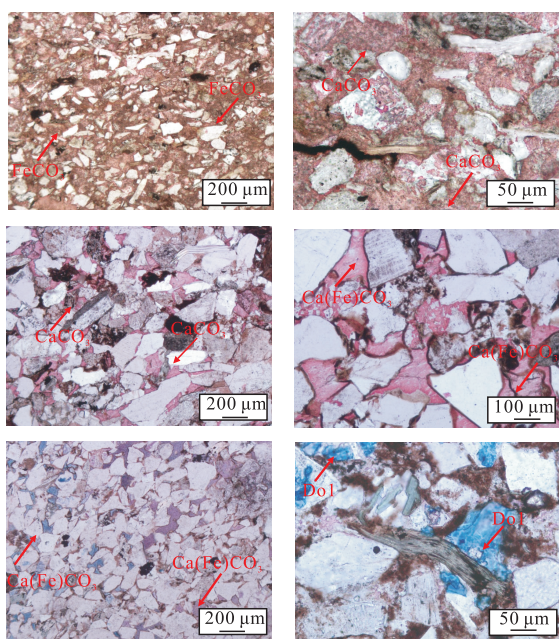


图2 碳酸盐胶结作用显微特征

Fig. 2 Microscopic characteristics of carbonate cementation

3.2 胶结对孔隙度的影响

碳酸盐胶结物的最主要作用是使储层孔隙度和渗透率降低,其含量的多少直接关系着储层物性的好坏。延长组储层大多为砂岩,其中泥质含量高,原始孔隙度低,渗透性、连通性差,岩层中流体饱和沉淀形成大量微晶胶结物^[11-13]。

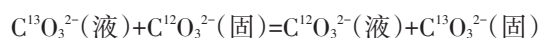
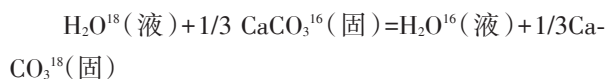
对钙质胶结物含量与储层孔隙度、渗透率进行投点,发现钙质胶结含量与储层孔渗参数具有好的负相关关系,当钙质胶结物含量达到20%,孔隙度降至3%~5%,渗透率降至 $(0.01 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,基本可以使储层孔隙完全堵塞,渗透能力彻底丧失。因此碳酸盐胶结物是使盆地内长8储层储层性质变差的重要因素,而另一方面,可见碳酸盐胶结作用能在砂体的顶部和底部形成一层钙质膜,使得层内颗粒间相互作用平衡后相对稳定,能够抵抗外部压实作用,间接起到保护内部孔隙的作用。

4 对碳—氧同位素鉴定结果的讨论

不同成因机理的碳酸盐胶结物往往具有不同的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围。例如生物成因的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在 $-4\% \sim -11\%$ ^[14],甲烷成因的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布在 $-5\% \sim +15\%$,而有机质热脱羧作用形成的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -20% 左右^[15]。当然,在混合情况下,碳

同位素值范围更加复杂。

碳酸盐沉积物的氧、碳稳定同位素组成与沉积环境介质的同位素组成有关,不断发生同位素分馏和交换,在 $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 反应系统存在氧—碳同位素反应式如下:



以上反应最终达到平衡,碳酸盐的稳定同位素组成主要取决于碳酸盐矿物相、水体的盐度和温度。当矿物相明确时(如方解石),稳定同位素组成仅取决于水体的温度和盐度。因此,可以利用碳酸盐岩中氧同位素和碳同位素组成来确定水介质的盐度和温度。

4.1 沉积环境古盐度

$\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 都会随着介质盐度的升高而升高,Epstein和Mayeda将 $\delta^{18}\text{O}$ 随介质盐度升高而升高这一现象归因于蒸发作用^[16]。Keith和Weber对侏罗纪以来的海相石灰岩和淡水石灰岩进行氧—碳同位素研究,利用测定的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值的相关性建立了经验公式:

$$Z = 2.048 \times (\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498 \times (\delta^{18}\text{O} + 50)$$

公式中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 用PDB标准,当 $Z > 120$ 时是海相—盐湖相石灰岩, $Z < 120$ 的是淡水石灰石。校正 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值后带入公式,碳酸盐胶结物 Z 值可以通过计算得到(表1、图3)。从实验鉴定结果可知:这批样品的 Z 值都小于120,说明沉积环境盐度较低,胶结物形成于淡水—微咸水环境,结合湖相沉积环境和鄂尔多斯三叠纪时的地质背景可知砂岩储层碳酸盐物质的物源主要为沉积物的风化和溶解作用产

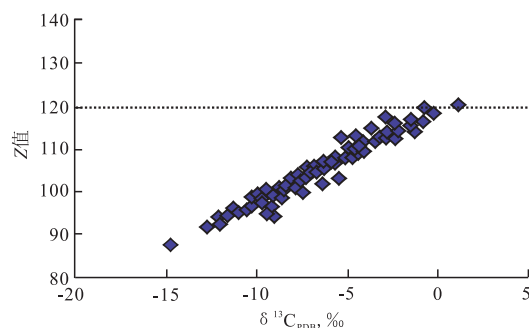


图3 碳酸盐胶结物中碳氧同位素值导出的Z值分布
Fig. 3 Z value distribution in carbonate cements which is derived from carbon and oxygen isotope values

物^[17-18]。各沉积亚相的碳氧同位素值与Z值关系展开分别介绍,它们均与鄂尔多斯晚三叠世湖盆特征恢复后的结果相一致^[19]。

半深湖相泥岩碳同位素值为-1.5‰~-1.6‰,平均值为-1.55‰;氧同位素值为-15.7‰~-15.5‰,平均值为-15.6‰;Z值为116.3~116.4,平均值为116.3。碳同位素相对较重,可能是由于其来源于无机碳酸盐岩的溶解碳。

三角洲前缘的碳同位素值分布在-5.5‰~-14.8‰,平均值为-8.5‰;氧同位素值分布在-13.6‰~-25.7‰,平均值为-18.6‰;Z值分布在87.6~105.8,平均值为100.6。前缘相带的碳酸盐胶结物,其碳源主要是混源,有机碳少量加入,但以无机碳为主。

砂质碎屑流的碳同位素值分布在-2.36‰~-5.8‰,平均值为-4.3‰;氧同位素值分布在-10.5‰~-17.6‰,平均值为-14.8‰;Z值分布在108~114.5,平均值为111。处在前缘相与半深湖相之间的相带,其碳源既无机也有有机来源,与三角洲前缘沉积相类似。

浊流的碳同位素值分布在-2.4‰~-5.7‰,平均值为-4.6‰;氧同位素值分布在-9.9‰~-19.8‰,平均值为-14.7‰;Z值分布在107.51~114.49,平均值为110.5。浊流的碳氧同位素值和砂质碎屑流的碳氧同位素组成类似。

三角洲平原亚相的河道砂体的碳同位素值分布在-6.3‰~-12.8‰,平均值为-9.8‰;氧同位素值分布在-14‰~-25.4‰,平均值为-17.8‰;Z值分布在91.9~107.3,平均值为98.4。其碳同位素最轻,氧同位素与三角洲前缘相似,说明其碳源主要来自有机碳的CO₂。Z值较低,说明其成岩环境为淡水环境。

4.2 沉积环境古温度

水体温度也是控制碳酸盐稳定同位素组成的重要因素,δ¹⁸O值常被用来测定古温度,作为确定环境温度的地质温度计。当水-岩反应达到平衡时,水体盐度基本保持不变时,随着温度的升高,δ¹⁸O值减小。因此有人总结出O温度计的计算公式如下:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 16.9 - 4.38 \times (\delta_c - \delta_w) + 0.1 \times (\delta_c - \delta_w)^2$$

其中:δ_c为实测的碳酸盐岩样品的δ¹⁸O值,δ_w为标准样品形成时介质水的δ¹⁸O值,δ¹⁸O采用SMOW标

准。因为研究区碳酸盐胶结物形成环境总体属于淡水环境,所以δ_w取大气淡水与海水的混合水(δ¹⁸O=-2.5‰,SMOW)^[20]。

基于这一公式,对研究区三叠系延长组砂岩样品中的碳酸盐胶结物形成的古温度进行了计算(表1、图4)。

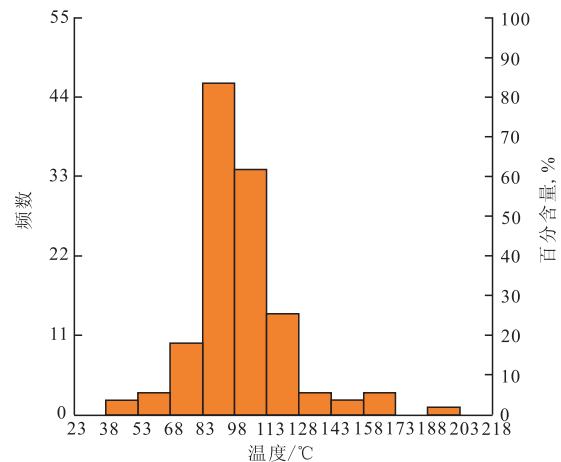


图4 研究区样品碳酸盐胶结物形成的温度分布区间

Fig. 4 Temperature distribution of carbonate cement formation in the study area

从图4中可以看出,碳酸盐胶结物形成的温度主要是68~128℃。根据成岩阶段划分标准,其形成于早成岩阶段B期至中成岩阶段A期。从表1可知形成温度与储层深度有一定关系,因为不同埋深热演化程度不同。另外对比其他学者对延长组油气藏包裹体的研究成果:延长组中方解石的沉淀温度在60~80℃,白云石和铁白云石集中在100~125℃,铁方解石的沉淀温度集中在75~125℃^[9]。与实验计算的结果一致。

4.3 碳酸盐胶结物物质来源

碳酸盐中碳-氧同位素组成不仅可以反映胶结物形成时的温度、盐度和有机碳比例,同时碳同位素组成还能反映成岩流体中碳的来源,不同形成机制的碳酸盐胶结物通常具有不同的δ¹³C值分布范围^[21]。通过对研究区碳-氧同位数值投点分区后,发现基本都落入Ⅲ区,即与有机酸脱羧作用有关的碳酸盐沉积(图5)。地温在80℃以前,有机质在演化过程中形成的有机酸大都被细菌所破坏,形成CH₄和CO₂。CO₂分压增高,含有大量HCO₃⁻、CO₃²⁻、Ca²⁺及Fe²⁺的地层水由于泥岩的压实作用而被排除,进入附

近砂岩层中,形成CaCO₃沉淀;且有部分Fe²⁺参与晶格,形成含铁方解石大量沉淀,再经历后期的重结晶作用而使结晶程度更高,即表现为镜下亮晶的特征,阴极发光特征为暗黄色与橙红色(图6)。

通过对比长8₁和长8₂的碳酸盐胶结物的含量发现,长8₁的碳酸盐含量远比长8₂高,长8₁接近长7层,而长7层烃源岩发育。随着烃源岩不断演化和储层形成,长7烃源岩释放大量有机酸,直接影响了长8上部储层,进而发生大量碳酸盐胶结作用,这也是碳酸盐胶结作用和有机脱羧作用有关的证据。

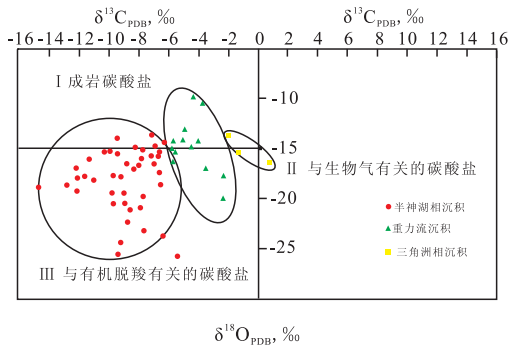


图5 鄂尔多斯盆地延长组长8储层碳酸盐胶结物碳酸盐胶结物δ¹⁸O与δ¹³C相关关系及物质来源判识

Fig. 5 Correlation between carbonate cement δ¹⁸O and δ¹³C in carbonate cement and identification of the source of carbonate cementation material in 8 reservoir of Yanchang Formation in Ordos Basin

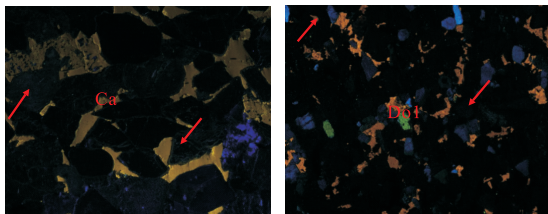
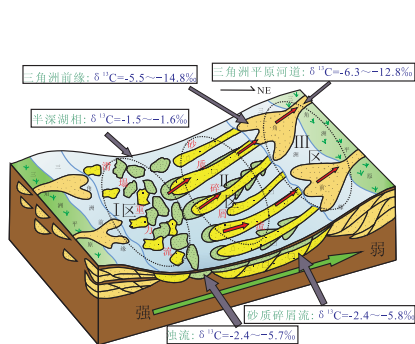


图6 碳酸盐胶结物显微阴极发光特征

Fig. 6 Cathodoluminescence characteristics of carbonate cement



4.4 碳—氧同位素分布规律及原因

从氧—碳同位素对应关系图5可以看到不同沉积相的胶结物碳、氧同位素分布总体上呈一定相关性,因而碳—氧同位素反映的盐度、温度和物源等环境参数间也存在着一定对应关系。体现为从湖中心经过河道重力流相到三角洲,其碳氧同位素逐渐变轻:半深湖相泥岩中碳酸盐胶结物的碳氧同位素相对较重,主要为无机碳,为沉积作用早期浅埋深环境形成;而砂质碎屑流、三角洲前缘和平原相的碳酸盐胶结物碳—氧同位素明显变轻,说明在胶结物形成时加入了封闭储层环境以外的有机碳,并且逐渐远离湖心,有机碳混入的比例也随之增大。

姚泾利等(2011)曾根据不同期次碳酸盐胶结物碳氧同位素在不同相间的分布规律^[13],提出同位素分布模式图,根据其提出理论,将研究区域划分为三个区(图7):

I区位于半深湖中。碳酸盐胶结物主要是早期泥晶碳酸盐 and 同生碳酸盐岩,多呈基底式胶结。胶结物碳同位素较重,大于-2 ‰。

II区位于半深湖和前缘之间的过度区域,包括砂质碎屑流和浊流沉积区。由于烃源岩热演化生成的有机酸首先经过该区,因此酸度较高。但有机成因的CO₂进入碳酸盐胶结物的量较少。溶蚀作用非常发育,碳酸盐胶结物相对不发育,碳同位素值分布在-2 ‰ ~ -6 ‰。

III区位于三角洲前缘和三角洲平原,有机酸在溶蚀的过程中逐渐被消耗,有机成因的CO₂能够以碳酸的形式存在,然后与流体中的钙离子、铁离子、镁离子等结合发生沉淀。碳酸盐胶结物主要为中晚期胶结物,分布在粒间孔隙或溶蚀孔隙中,碳同位素值

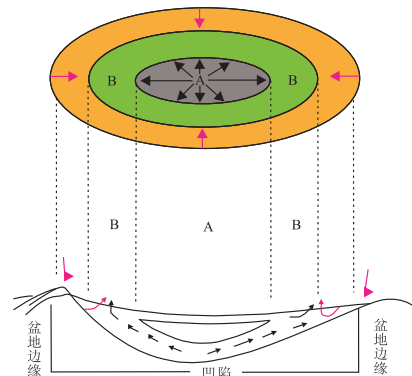


图7 鄂尔多斯盆地长8碳酸盐胶结物分布模式以及流体运移模式

Fig. 7 Model diagram of the carbonate cements distribution and model diagram of fluid migration in Chang-8 formation Ordos Basin

偏轻,分布在 -6% ~ -15% 。

胶结物的形成与成岩流体密切相关,同位素特征变化也会留下证据。因此,也可以推断流体流动模式。长8储层成岩演化阶段处在中成岩阶段早期,有机碳主要来源于大量混入成岩流体的烃类有机质转化的有机酸。湖相泥岩中碳酸盐岩的碳氧同位素相对较重,主要为无机碳,多为早期碳酸盐;而砂质碎屑流、三角洲前缘和平原相的碳酸盐胶结物碳氧同位素明显变轻。氧—碳同位素由湖心向四周逐渐减轻,说明在晚期碳酸盐形成时有机碳的混入。在整个盆地范围内随着与湖中心距离的增大,有机碳含量随之增大。因此,与油气相关的盆地流体活动造成了有机碳的加入。长8储层砂体中有机碳主要来源于烃类侵位作用,该作用中有机碳所形成的有机酸经过溶蚀作用次生孔隙形^[22-23]。结合盆地长8烃源岩厚度最大区、镜质体反射率图及剩余压力高值区等方面的证据^[24-25],判断流体运移机制为:流体运移是以压实流的方式进行的。成岩流体以泥岩压实流为主,烃类侵位使有机酸加入形成的酸性流体由盆地中部高压势区(A区)向四周的低压力势区(B区)运移,导致盆地四周有机碳大量赋存。之后又经过脱羧等一系列变化最终形成碳酸盐胶结。这一过程也改变了不同沉积环境碳酸盐胶结物碳同位素的组成。据此,总结出研究区流体流动的模式(图7)。

5 结论

通过薄片、碳氧同位素等分析,结合沉积相分析。系统研究了鄂尔多斯盆地长8储层碳酸盐胶结物,得出以下结论:

1) 长8储层分为长8₁和长8₂层,碳酸盐胶结矿物包括白云石、方解石、铁白云石、铁方解石等,对储层孔渗主要起破坏作用。长8₁比长8₂碳酸盐胶结物含量多,长8₁因靠近长7,受长7烃源岩演化过程中释放的有机酸的影响较大,形成的与之有关的碳酸盐胶结也比较多,所以碳酸盐胶结与有机脱羧有关,碳酸盐胶结物碳的来源主要来自有机酸脱羧释放的CO₂。

2) 碳酸盐胶结形成的温度主要为68~128℃,正处于早成岩B期至中成岩阶段A期,形成温度随埋深加深有增加的变化趋势。由Z值可知碳酸盐胶结

形成于淡水—微咸水环境,由深湖—半深湖到三角洲前缘到三角洲平原环境相对盐度逐渐降低。

3) 氧—碳同位素由湖心相四周逐渐减轻。由于氧—碳同位素分布特征与沉积环境的相关性明显,可划分为三个区,建立对应关系。根据不同沉积相胶结物同位素特征推导成岩流体中同位素的运移模式:有机酸加入形成的酸性流体在压实作用流体的带动下由盆地中部高势区向四周的低势区运移。

参考文献

- [1] 高有峰,刘万洙,纪学雁,等. 松辽盆地营城组火山岩成岩作用类型、特征及其对储层物性的影响[J]. 吉林大学学报, 2007, 37(6):1251-1258.
- [2] 黄思静,黄培培,王庆东,等. 胶结作用在深埋藏砂岩孔隙保存中的意义[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(3):7-13.
- [3] Mccrea J M. On the isotopic chemistry of carbonates and a palaeotemperature scale[J]. Journal of Chemical Physics, 2004, 18(6): 849-857.
- [4] Cerling T E. The stable isotopic composition of modern soil carbonate and its relationship to climate[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2011, 71(2): 229-240.
- [5] Cerling T E, Quade J, Wang Y, et al. Carbon isotopes in soils and palaeosols as ecology and palaeoecology indicators[J]. Nature, 1989, 341(6238): 139-139.
- [6] Liu B, Phillips F M, Campbell A R. Stable carbon and oxygen isotopes of pedogenic carbonates, Ajo Mountains, southern Arizona: implications for paleoenvironmental change[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1996, 124(3-4): 233-246.
- [7] Monger H C, Cole D R, Gish J W, et al. Stable carbon and oxygen isotopes in Quaternary soil carbonates as indicators of ecogeomorphic changes in the northern Chihuahuan Desert, USA [J]. Geoderma, 1998, 82(1-3): 137-172.
- [8] Longstaffe F J. Stable isotope studies of diagenetic processes[M]// Stable isotope geochemistry of low temperature processes, 1987.
- [9] 孙致学,孙治雷,鲁洪江,等. 砂岩储集层中碳酸盐胶结物特征——以鄂尔多斯盆地中南部延长组为例[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(5):543-551.
- [10] 王琪,嵇喜准,陈国俊,等. 延长组砂岩中碳酸盐胶结物氧碳同位素组成特征[J]. 天然气工业, 2007, 27(10):28-32.
- [11] 仲向云. 鄂尔多斯盆地西部三叠系延长组长8储层特征研究[D]. 西安:西安石油大学, 2013.
- [12] 齐亚林,宋江海,王立社,等. 鄂尔多斯盆地正宁地区延长组长6、长8砂岩储层成岩作用特征[J]. 西北地质, 2009, 42(3):95-101.
- [13] 姚涇利,王琪,张瑞,等. 鄂尔多斯盆地中部延长组砂岩中碳酸盐胶结物成因与分布规律研究[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(6):943-950.

(下转第46页)